ALTERATION DES STRUCTURES HISTORIQUES EN MAÇONNERIE

R. Ezzdine*– S.Yotte* –P. Malaurent* –D. Breysse* – P. Sin*

**Centre de Développement des Géosciences Appliquées, Université Bordeaux 1, avenue des facultés, 33405 Talence cedex*
r.ezzdine@cdga.u-bordeaux1.fr, s.yotte@cdga.u-bordeaux1.fr, p.malaurent@ cdga.u-bordeaux1.fr, d.breysse@cdga.u-bordeaux1.fr, p.sin@cdga.u-bordeaux1.fr

RÉSUMÉ : *La pierre monumentale subit au fil du temps des mécanismes physico-chimiques générant des altérations. On s'intéresse à l'étude expérimentale et numérique du comportement d'un batiment de la citadelle de Blaye. Une description des altérations et des mécanismes d'altérations est faite. Nous proposons ensuite d'évaluer les conditions environnementales favorisant ces mécanismes, comme le vent, la température et l'humidité, en réalisant des mesures in-situ. Finalement, les résultats des premières simulations numériques du comportement élastique du batiment sont présentées*

ABSTRACT: *Monumental stone is continuously exposed to physicochemical weathering mechanisms. We present an experimental and a numerical study of the behaviour of one building of the fortress of Blaye. Different types of decay affecting the building are described as well as their mechanisms. Then, the environmental conditions involved in the weathering process, like wind, temperature and humidity, are evaluated with in-situ measurements. And to end, we present the first results of the numerical study of the elastic behaviour of the structure.*

MOTS CLÉS : *pierre, monuments historiques, mécanismes de dégradation, environnement, modélisation.*

KEYWORDS: *stone, historical monuments, weathering mechanisms, environment, modelisation.*

1. Introduction

La pierre monumentale subit au fil du temps des mécanismes physico-chimiques générant des altérations. Ces altérations détruisent l'épiderme des monuments, et à terme, elles peuvent affecter la structure porteuse et sa stabilité.

Durant ces dernières décennies, un progrès considérable a été accompli dans le domaine de réhabilitation des structures en maçonnerie du point de vue du développement des méthodes quantitatives du calcul de ces structures. Ces méthodes visent principalement à l'évaluation de l'état de la structure et de sa sécurité. Elles nécessitent une base de connaissances très précises concernant le comportement des matériaux et des systèmes structuraux qui sont différents de ceux d'aujourd'hui (Lourenço, 2005).

Dans le cadre de la maintenance d'ouvrages historiques, le projet MEDACHS met en place une étude visant trois objectifs. Le premier consiste à identifier les mécanismes d'endommagement des différents matériaux (béton, acier, bois, pierre, mortier) en atmosphère marine, le second à détecter l'endommagement des structures, et le troisième consiste à mettre en œuvre un outil d'aide à la décision pour les monuments de l'Espace Atlantique. L'un des matériaux étudié est la pierre avec comme objectif l'étude des bâtiments historiques en maçonnerie. C'est pourquoi la ville de Blaye s'est associée au projet en mettant à notre disposition un bâtiment de la citadelle (site exceptionnel sur l'estuaire de la Gironde) pour faire une étude (figure 1).

L'édifice choisi pour l'étude est la porte de Liverneuf (figure 2). Il s'agit du point le plus haut de la citadelle, il est beaucoup plus exposé aux intempéries qu'un autre bâtiment. De plus, une annexe fermée et équipée de l'alimentation électrique est mise à notre disposition. Trois murs d'orientation différente sont accessibles pour faire des mesures et peuvent être équipés.

La stratégie d'investigation s'appuie sur une étude expérimentale, qui consiste à réaliser des mesures in-situ et au laboratoire, et sur une étude numérique qui vise à simuler l'évolution de l'endommagement de la structure dans le temps.

On présentera dans cet article les objectifs de l'étude expérimentale concernant l'identification des conditions environnementales et le dispositif expérimental, et les premières études numériques.

Figure 1. La citadelle de Blaye.

Figure 2. La porte de Liverneuf.

2. Mécanismes d'altération

L'altération de la pierre est un processus complexe qui résulte de la combinaison de mécanismes de dégradation chimiques, physiques et mécaniques. Ce processus est généralement dû à l'action de la pluie, du vent, du soleil, des cycles gel-dégel, et à la cristallisation des solutions. Nous nous focalisons sur ce dernier aspect.

En effet, l'eau de pluie réagit avec les différents oxydes existants dans l'air comme l'oxyde de carbone, de soufre et d'azote et forme une solution acide. La solution pénètre par les capillaires et dissout les minéraux du matériau. Pendant le séchage, les cristaux se déposent, et augmentent de volume puisque le sel dissout occupe un volume moins important que le sel cristallisé. D'autre part, ils obstruent les pores et forment une croûte imperméable à la surface.

La cristallisation induit alors une microfissuration, donc une augmentation de la porosité, ce qui accélère le phénomène. De plus, la croûte imperméable empêche l'eau de s'évacuer : elle s'écoule derrière la croûte et détruit progressivement le matériau.

Si, de plus, la pluie contient des sels (embruns), le mécanisme de cristallisation-dissolution joue non seulement sur les sels minéraux du matériau mais aussi sur le sel marin introduit par la pluie dans la pierre. L'effet des embruns peut se faire sentir jusqu'à 100 km à l'intérieur des terres. La citadelle de Blaye se situe sur l'estuaire de la Gironde et à moins de 100 km de l'océan. Il y a donc combinaison de pluisieurs causes de dégradations : la pluie, les embruns, la pollution, …

Des études montrent que la température constitue un facteur important qui joue sur la solubilité des sels dans la pierre (Rijniers, 2005) (Watt, 2000).

3. Etude expérimentale.

3.1. *But de l'étude expérimentale*

L'étude expérimentale, allant de l'examen général de la structure jusqu'à l'échelle de la pierre vise à quantifier les mécanismes de dégradations et les paramètres environnementaux favorisant l'altération du matériau. Elle est répartie sur trois phases : une phase d'observation naturaliste, une phase d'essais in-situ, et une phase d'investigation complémentaire réalisée sur échantillons en laboratoire et qui sera réalisée par la suite. Les différents paramètres influents qui ont fait l'objet de l'étude expérimentale, décrite dans ce travail, sont : l'humidité, le vent, et la température. Leur suivi temporel permettra de mieux connaitre l'évolution des conditions propices à l'altératon.

3.2. *Types d'altérations observés sur le site*

La première phase de l'étude expérimentale consiste à faire un examen général des désordres à l'échelle de la structure et à établir un constat. Cette partie nous a permis de dégager les points suivants :

- des encroûtements noirâtres, essentiellement situés dans les parties humides abritées des pluies des deux murs nord et est (figure 4). Ils correspondent éventuellement à des dépôts issus de l'environnement urbain.
- des faciès d'altération de type alvéolisation, situés de façon privilégiée dans les zones exposées des murs nord et est (figure 4). Ce type d'altération résulte essentiellement de l'attaque chimique des oxydes existant dans l'air.
- des désagrégations sableuses repérées sur les parties basses du mur nord et du mur ouest. Elles sont dues en grande partie aux fluctuations de l'humidité dans les murs et aux cycles cristallisation-dissolution.
- la quasi-totalité des joints entre les pierres sont ouverts (dégradation totale du mortier) aux différents angles du bâtiment. La capacité de résistance structurale s'en trouve affectée.

a. Encroûtements noirâtres (partie haute du mur nord)

b. Des alvéolisations dans les deux directions horizontale et verticale (mur nord)

Figure 3. Types d'altération affectant le batiment.

3.3. *Les mesures et les dispositifs expérimentaux*

Trois types de mesures sont effectués : mesures météorologiques classiques, mesures thermiques, et mesures hydriques.

Pour les mesures météorologiques, on distingue les conditions climatiques et les conditions micro-climatiques. Pour les conditions climatiques, on s'appuie sur les mesures officielles des stations Météo France les plus proches du site pour connaître les tendances régionales. Les paramètres mesurés sont : la pluie, le vent et la température de l'air. Pour identifier le type des gaz polluants existant dans l'air ambiant et leurs quantités, nous consulterons les différentes stations de surveillance de la région. Pour les conditions micro-climatiqes, on s'intéresse à la direction et la vitesse du vent très près du mur, à la pression atmosphérique, et à l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur du batiment. Ces paramètres sont mesurés par une mini station climatique.

Les mesures de température permettent d'évaluer les transferts thermiques dans le mur. Pour celà, nous mesurons la température de surface intérieure et extérieure du mur, la température extérieure et intérieure de l'air, et le flux thermique. On mesure aussi la température dans la pierre et dans le joint adjacent à trois profondeurs pour mieux identifier les paramètres caractérisant ce flux. Enfin, on mesure l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment à l'aide d'une sonde capacitive. Cela permettra de suivre les transferts de masse dans l'épaisseur de la paroi.

3.4. *Résultats*

La figure 4 présente les mesures de température à l'extérieur et celles relevées dans la pierre à 3 profondeurs : 5cm, 10cm et 15cm de la face intérieure du mur. Les points ont été relevés avec un pas d'échantillonnage de 10 secondes. Ce qui permet d'avoir un bon suivi au cours de la journée et de décrire les variations rapides. On remarque que la température extérieure et celle du mur sont très voisines pendant le jour alors que l'écart durant la nuit peut même atteindre les 2°C. Les variations de

température journalière dans le mur ont une cinétique inférieure à celle de la température extérieure. On remarque également que l'écart entre les mesures de température enregistrées par les deux capteurs proches de la surface extérieure est très petit alors que l'écart entre ces deux mesures et celles enregistrées par le capteur le plus profond est plus accentué pour une même profondeur. On peut donc penser que les propriétés thermiques du matériau sont différentes sur les 10 premières centimètres exposés aux intempéries et les 5 suivants.

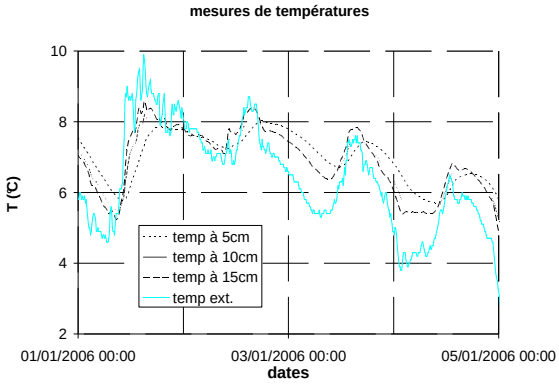

Figure 4. Mesures de température de l'air extérieur et dans la pierre.

4. Etude numérique

4.1. *Techniques de modélisation*

Les différentes techniques de modélisation basées sur la méthode des éléments finis, peuvent être classées en quatre catégories. Dans la première, la micro-modélisation, les blocs (pierre, brique, blocs de béton) et les joints sont modélisés séparément en réalisant des maillages très fins. Dans la deuxième catégorie, on s'intéresse surtout au calcul des comportements moyens. On applique des techniques d'homogénisation avec des modèles généralement basés sur la théorie de plasticité et sur l'endommagement. Ces méthodes nécessitent des calculs numériques relativement lourds dans le domaine non linéaire (Lopez, 1999). Pour résoudre ce problème, une troisième catégorie d'approches a été proposée : c'est alors le comportement moyen d'un ensemble bloc-joint qui constitue l'élément de base du modèle (Lourenço, 1996). Ce type de modélisation permet de réaliser des maillages indépendamment de la géométrie locale des blocs. La quatrième catégorie, la macro-modélisation, s'intéresse au calcul des structures de grande taille. Les lois de comportement appliquées sont empiriques et nécessitent des études expérimentales lourdes et coûteuses.

Comme qu'on s'intéresse à l'endommagement, chimique et physico-mécanique, des deux constituants et de leur interaction avec les conditions environnementales, on s'est orienté vers une modélisation assez fine. Le modèle choisi s'inscrit alors dans la première catégorie. Il permet de représenter au mieux la réalité géométrique de la structure et d'identifier séparément les comportements des pierres et des joints.

4.2. *Modélisation de la structure*

L'objectif de l'étude numérique est de modéliser au cours du temps les interactions entre la dégradation mécanique du matériau et celle due au vieillissement. La dégradation mécanique se matérialise par l'apparition des fissures, et peut être modélisée par la théorie de l'endommagement. La dégradation chimique due au vieillissement modifie les propriétés mécaniques du matériau en augmentant sa porosité. Elle dépend des paramètres environnementaux étudiés dans la partie 3.

Un maillage 3D est réalisé à l'aide du logiciel CAST3M avec des éléments finis coque à 4 nœuds pour limiter le temps de calcul et l'espace mémoire occupé. Une première étude est faite pour tester le maillage avec comme sollicitations le poids propre de la structure et l'action du vent sur la façade nord calculée selon les règles de l'Eurocode (tableau 1). Le comportement de la structure est considéré comme élastique linéaire (tableau 2). Des hypothèses simplificatrices sont adoptées sur l'épaisseur des joints (1cm) et sur les conditions limites (encastrement au sol des trois façades, et encastrement au bâtiment des façades est et ouest).

Tableau 1. Paramètres utilisés pour calculer l'action du vent (h est la hauteur de la paroi, b est sa largeur, q_{ref} et V_{ref} sont respectivement la pression dynamique de référence et la vitesse du vent de référence, ρ_{air} est la masse volumique de l'air, C_e est le coefficient d'exposition, et P est la charge du vent résultante).

h (m)	b (m)	q_{ref} (Pa)	V_{ref} (m/s)	ρ_{air} (kg/ m^3)	C_e	P (Pa)
4.79	1.95	414	26	1.225	1.5	534

Tableau 2. Paramètres du modèle linéaire élastique (E est le module d'Young, μ est le coefficient de Poisson et ρ est la masse volumique).

Matériau	E (Mpa)	μ	ρ (t/ m^3)
Pierre	8400	0.2	2.2
Mortier	350	0.2	1.8

La figure 5 présente le maillage et la déformée sous l'action du vent et du poids propre de la structure.

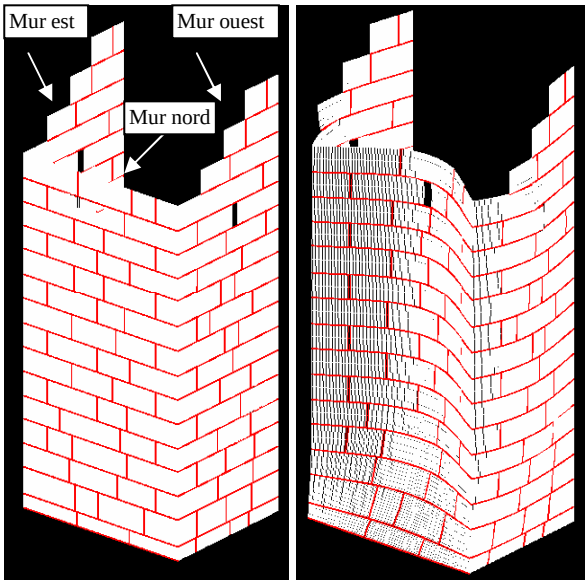

figure 5. Maillage et déformée de la structure.

5. Conclusions et perspectives

L'altération de la pierre est due à la combinaison de mécanismes de dégradation chimiques, physiques et mécaniques. Un premier constat sur les différents types d'altération observés sur le site est établi. Un dispositif expérimental est mis en place pour mieux suivre l'évolution des conditions favorisant ces altérations. Ces paramètres serviront par la suite à connaître l'évolution de la porosité du matériau dégradé et donc à modéliser la dégradation chimique due au vieillissement. Un modèle numérique est développé dans lequel le maillage est réalisé avec des éléments finis coque à 4 nœuds. Ceci nous a permis de réaliser un maillage qui représente la réalité géométrique du bâtiment sans avoir recours l'homogénisation.

Le développement d'un modèle d'endommagement pour la maçonnerie qui tient compte du couplage dégradation mécanique-dégradation chimique due au vieillissement permettra par la suite de mieux approcher l'évolution du comportement réel de la structure dans le temps.

6. Remerciements

Ce travail est financé par le FEDER, Interreg Espace Atlantique, projet MEDACHS n°197. Les auteurs remercient la mairie de Blaye pour son aide.

7. Bibliographie

Lopez J., Ollier S., Lubliner J., « A homogeneous constitutive model for masonry », *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 46, n° 10, 1999.

Lourenço P.B., « Computational strategies for masonry structures », *PhD thesis*, Delft University of Technology, 1996.

Lourenço P.B., « Assessment, diagnosis and strengthening of Outeiro Church, Portugal », *Construction and Building Materials*, n° 19, 2005:634-645.

Rijniers L.A., Pel L., Huinink H.P., Kopinga K., « Salt cystallisation as damage mechanism in porous building materials – a nuclear magnetic resonance study », *Magnetic Resonance Imaging* , n° 23, 2005:273-276.

Watt D., Colston B., « Investigating the effects of humidity and salt crystallisation on mediavel masonry », *Building and Environment*, n° 35, 2000:737-749.